

тий не произойдет, определяется правилом умножения вероятностей:

$$P(A) = (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n) = \prod_{i=1}^{i=n} (1 - P_i).$$

Рассмотрим два события: событие A, состоящее в том, что ни одно из событий A_1, A_2, \dots, A_n не произойдет, и событие B, состоящее в том, что произойдет хотя бы одно из событий A_1, A_2, \dots, A_n . Очевидно, события A и B противоположны. Следовательно, интересующая нас вероятность наступления хотя бы одного из событий A_1, A_2, \dots, A_n (все равно какого) определяется из равенства

$$P(B) = 1 - \prod_{i=1}^{i=n} (1 - P_i).$$

Если все события A_1, A_2, \dots, A_n имеют одинаковую вероятность q , то вероятность наступления хотя бы одного из них

$$P(B) = 1 - q^n,$$

где n – число независимых событий.

Если каждая из вероятностей $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ много меньше единицы, то вероятность появления одного из независимых событий приближенно определяется из равенства

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n.$$

Если система содержит N независимых приборов и каждый из приборов имеет высокую надежность, т. е., вероятности выхода из строя приборов малы ($P_i \ll 1$), то вероятность выхода из строя системы из N независимых приборов определяется вероятностью выхода из строя каждого прибора.

Перечень возможных значений случайной величины и их вероятности можно свести в таблицу, называемую таблицей распределения, или построить график зависимости вероятности от значения случайной величины. Такую таблицу или график называют законом распределения случайной величины. Дискретная случайная величина может быть полностью определена таблицей распределения.

Таблица

X	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
P	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6

ЛИТЕРАТУРА

- Поляков К.Л. Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1986
- Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем. М.: Радио и связь. 1988
- Анищенко В.А. Надежность систем электроснабжения. – Минск: УП. Технопринт, 2001. – 160 с.
- Волков Е.Б. Основы теории надежности ракетных двигателей/ Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. – М.: Выш. Шк., 1975. -296 с.
- Галась М.И. Оценка надежности элементов автоматики с учетом априорной информации об отработке аналогов/ М.И. Галась, Ю.Ф. Даниев, А.В. Демченко// Техническая механика.-2002.-№1.

УДК 621.3.019.3

Хаднов В.В.

Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, Москва, Россия

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Исследование осуществлено в рамках «Программы фундаментальных исследований» НИУ ВШЭ в 2013 году. Справочник «Надежность ЭРИ» [1] является официальным документом Министерства обороны Российской Федерации и содержит сведения о моделях расчета (прогнозирования) надежности комплектующих элементов, применяемых при разработке (модернизации), производстве и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры.

В справочнике приведены математические модели эксплуатационной интенсивности отказов для следующих классов комплектующих элементов:

- Интегральные микросхемы
- Полупроводниковые приборы

В таблице X_1, X_2, \dots, X_n – все возможные значения случайной величины; $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ – вероятности этих значений.

Все возможные значения случайной величины X образуют полную систему событий и поэтому $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$.

Параметры дискретных случайных величин.

Таблица распределения полностью характеризует случайную величину, но пользоваться ею непосредственно не всегда удобно. Многие задачи можно решать, пользуясь усредненными числовыми характеристиками – параметрами случайных величин.

Математическое ожидание есть такое число, около которого будут колебаться средние значения случайной величины, вычисленные для каждой серии испытаний. Математическое ожидание и среднее значение недостаточно характеризуют случайную величину. Во многих практических случаях очень важно знать, насколько отличаются друг от друга отдельные значения случайной величины.

Математическое ожидание отклонений близко к нулю, так как при сложении положительных и отрицательных отклонений они взаимно уничтожаются. Поэтому для получения усредненной характеристики отклонений пользуются математическим ожиданием абсолютных значений отклонения:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} |X_i - M(X)| P_i.$$

Эта величина называется средним отклонением. Она хорошо и наглядно характеризует степень рассеяния значений случайной величины, но для расчетов неудобна. На практике в большинстве случаев пользуются не средним, а средним квадратичным отклонением.

Заключение

В заключении можно отметить, что в результате применения статистических методов контроля закономерностей в множестве случайных событий можно повысить качественные показатели изделий. Для выявления закономерностей массовых случайных событий ведётся статистика.

Оптоэлектронные полупроводниковые приборы

- Изделия квантовой электроники
- Генераторные, модуляторные, регулирующие лампы
- Газоразрядные приборы и высоковольтные катодроны
- Трубки электроннолучевые приемные и преобразовательные
- Знакосинтезирующие индикаторы
- Приборы фотоэлектронные
- Приборы фотоэлектрические
- Приборы пьезоэлектрические и фильтры электромеханические
- Резисторы
- Конденсаторы

Трансформаторы
Дроссели
Линии задержки
Лампы накачки
Источники высокointенсивного оптического излучения
Компоненты волоконно-оптических систем передачи информации
Коммутационные изделия
Установочные изделия
Соединители низкочастотные и радиочастотные
Электровакуумные приборы и модули СВЧ
Приборы ферритовые СВЧ
Аппараты электрические низковольтные
Машины электрические малой мощности
Силовые полупроводниковые приборы
Кабели, провода и шнуры электрические
Химические источники тока
Лампы электрические
Соединения
Платы с металлизированными сквозными отверстиями

Модели расчета эксплуатационной интенсивности отказов распространяются на период постоянства интенсивности отказов во времени (см. рис. 1).



Рис. 1. Типовая зависимость интенсивности отказов ЭРИ от времени

Описание математических моделей для расчета (прогнозирования) значений эксплуатационной интенсивности отказов включает в себя:

- аналитические выражения, показывающие зависимость базовой интенсивности отказов ЭРИ от учитываемых факторов.
- значения базовой интенсивности отказов ЭРИ;
- значения коэффициентов, входящих в модели прогнозирования эксплуатационной надежности ЭРИ, и аналитические выражения, показывающие зависимость этих коэффициентов от учитываемых факторов.

Значения эксплуатационной интенсивности отказов комплектующих элементов рассчитываются по математическим моделям, имеющим вид:

$$\lambda = \lambda_b \cdot \prod_{i=1}^I (K_i) \quad (1)$$

где λ_b - базовая интенсивность отказов, K_i - коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; I - число учитываемых факторов.

В справочнике [1] приведена следующая классификация коэффициентов, входящих в математические модели расчета интенсивности отказов ЭРИ (1):

Группа 1: коэффициенты, которые характеризуют зависимость интенсивности отказов от режимов и условий эксплуатации, уровня качества производства ЭРИ (коэффициенты, общие для всех моделей).

Группа 2: коэффициенты, которые характеризуют зависимость интенсивности отказов в заданных условиях эксплуатации от конструкционных, функциональных и технологических особенностей ЭРИ (коэффициенты моделей конкретных классов ЭРИ).

Фрагмент таблицы характеристик коэффициентов моделей расчета интенсивности отказов ЭРИ приведен на рис. 2.

Условные обозначения и названия коэффициентов моделей	Факторы, учитываемые коэффициентами
Общие коэффициенты моделей	
K_e (K_e) - коэффициент режима	Величина электрической нагрузки и (или) температура окружающей среды (корпуса изделия)
K_c - коэффициент приемки	Степень жесткости требований к контролю качества и правила приемки изделий
K_t - коэффициент эксплуатации	Степень жесткости условий эксплуатации
K_{γ} - коэффициент влияния ионизирующих излучений	Степень жесткости внешних ионизирующих излучений

Рис. 2. Общие коэффициенты моделей расчета интенсивности отказов

На рис. 3, в качестве примера, приведен фрагмент таблицы характеристик коэффициентов моделей расчета интенсивности отказов для класса «Интегральные микросхемы».

Условные обозначения и названия коэффициентов моделей	Факторы, учитываемые коэффициентами
Коэффициенты моделей конкретных классов ЭРИ	
K_s	Сложность ИС и температура окружающей среды
K_p	Величина напряжения питания для КМОП микросхем
K_{corp}	Тип корпуса ИС

Рис. 3. Коэффициенты модели расчета интенсивности отказов для класса «Интегральные микросхемы»

Однако БЭА широко применяются комплектующие элементы иностранного производства (ИП) [2]. Поскольку основным потребителями таких элементов являются компании, работающие по стандартам США, то для расчета интенсивности отказов ЭРИ ИП применяется стандарт MIL-HDBK-217 [3], который является официальным документом Министерства обороны США и содержит сведения о моделях прогнозирования надежности ЭРИ ИП.

В стандарте приведены математические модели эксплуатационной интенсивности отказов вида:

$$\lambda = \lambda_b \cdot \prod_{i=1}^I (\pi_i) \quad (2)$$

где λ_b - базовая интенсивность отказов, π_i - коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов; I - число учитываемых факторов.

Не смотря на то, что структура математических моделей (1) и (2) совпадает, между ними есть ряд отличий, которые затрудняют применение моделей (2) для расчетов надежности БА, разрабатываемой по Российским стандартам [4]. Рассмотрим главные из них.

Как уже отмечалось выше, модели справочника «Надежность ЭРИ» предназначены для расчета эксплуатационной интенсивности отказов, поэтому в нем приведены значения λ_b для конкретных типов (типономиналов) ЭРИ (см. рис. 4).

Типономинал ИС	d. шт.	$\lambda_b \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$	Типономинал ИС	d. шт.	$\lambda_b \cdot 10^6, \text{ч}^{-1}$
Микросхемы интегральные полупроводниковые цифровые					
134ЛБ1А, 6	1	0.11	564ЛБ	1	0.043
134ТВ1	1	0.07	564ЛС2	2	0.12
164ЛА7	2	0.21	564ЛУ4	1	0.21
169АА1	1	0.09	564РУ2А, 6	1	0.055
168АП2	2	0.18	585ЛК2	2	0.055
170АА7	2	0.12	566Б1А	2	6.7
539ЛА3	1	0.097	702ЛП107-2	1	0.096
541РТ2	1	0.52	1533ЛА1	2	0.36
564ИЕ19	8	0.13			

Рис. 4. Фрагмент таблицы значений λ_b

Значения λ_b для каждого типа ЭРИ, приведенные в справочнике, рассчитаны по результатам их испытаний ЭРИ на безотказность.

В случае если типа ЭРИ в таблицах справочника не приведено, то расчет интенсивности отказов заменяется прогнозированием ее значения, при этом вместо λ_b в модели (1) используется $\lambda_{b,c,g}$ (базовая интенсивность отказов группы ЭРИ - см. рис. 5).

Характеристика надежности и справочные данные отдельных групп полупроводниковых приборов

Группа изделий	d, шт.	$\lambda_{б.c.r.} \cdot 10^6$	d, шт.	$\lambda_{б.c.r.} \cdot 10^3$	K _б	Распределение отказов по видам, %			К _п	K _э
						внезапные		постепенные		
	обрые	короткое замыкание	пробой параметрический			5 (ВП)	9 (ОС)			
Приборы полупроводниковые, кроме приборов СВЧ диапазона										
Диоды кремниевые:										
диоды выпрямительные	55	0,091	0	0,0086	0,0009					0,2
диоды импульсные	27	0,025	3	0,002	0,0008					0,45
столбы выпрямительные	16	0,21	0	0,176	0,0084					0,35
варикапы подстроочные	16	0,022	0	0,002	0,0009	14	6			0,6
диодные сборки	0	0,008	1	0,088	0,011					0,45
Стабилитроны	30	0,0041	0	0,0056	0,0136					0,2
Ограничители напряжения	1	0,0043	—	0,0057	0,0132					0,2
Генераторы шума	0	0,086	0	0,009	0,001					0,2
Транзисторы биполярные кремниевые	54	0,044	6	0,013	0,003					
Транзисторные сборки кремниевые	5	0,095			0,0007					
Транзисторы полевые:						16	4			
кремниевые	29	0,065	0	0,007	0,0011					0,35
арсенидогаллиевые	14	0,578			0,0001					
Тиристоры кремниевые	25	0,2	8	0,079	0,0039	15	3			0,2 1,6

Рис. 5. Справочник «Надежность ЭРИ»: пример таблицы со значениями $\lambda_{б.c.r.}$.

Такой же подход используется в стандарте YIL-HDBK-217, в котором типы (типономиналы) ЭРИ не приводятся (см. рис. 6), т.е. значение λ_b в модели (1) также представляет собой среднегрупповую интенсивность отказов.

Base Failure Rate - λ_b

Diode Type/Application	λ_b
General Purpose Analog	.0038
Switching	.0010
Power Rectifier, Fast Recovery	.069
Power Rectifier/Schottky	.0030
Power Diode	.0050/ Junction
Power Rectifier with High Voltage Stacks	.0013
Transient Suppressor/Varistor	.0034
Current Regulator	.0020
Voltage Regulator and Voltage Reference (Avalanche and Zener)	

Рис. 6. MIL-HDBK-217: пример таблицы со значениями λ_b

Очевидно, что использование $\lambda_{б.c.r.} (\lambda_b)$ не только снижает точность расчетной оценки интенсивности отказов, но и требует дополнительно идентифицировать тип ЭРИ в соответствии с классификацией того или иного стандарта, чтобы выбрать требуемую математическую модель интенсивности отказов.

Еще одним отличием, которое может вызвать определенные трудности, является определение численного значения коэффициента K_b , который учитывает степень жесткости условий эксплуатации и показывает, во сколько раз интенсивность отказов ЭРИ в аппаратуре конкретного класса (группы эксплуатации) выше при всех прочих равных условиях, чем в наземной стационарной аппаратуре [5]. Это связано с тем, что классификации групп эксплуатации в ГОСТ

РВ 20.39.304 [6] и в MIL-HDBK-217 не совпадают.

Так, например, в ГОСТ РВ 20.39.304 группа эксплуатации 3.2 «Аппаратура дозвуковых самолетов», к которой относится БЭА мониторинга распределенных систем, подразделяется на 7 подгрупп, в зависимости от зон самолета (зоны А-Ж на рис. 7), в которых она располагается.

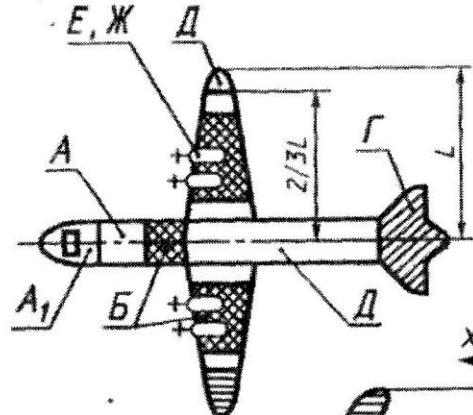


Рисунок 7. Зоны размещения аппаратуры

В стандарте же MIL-HDBK-217 аналогичная группа (A_c) подразделяется всего на 2 подгруппы A_{c1} и A_{c2}.

Вместе с тем, в справочнике «Надежность ЭРИ» для всех 7 подгрупп группы 3.2. для класса «Интегральные микросхемы» приведено лишь одно значение K_б (см. рис. 8), в то время как в MIL-HDBK-217 для того же класса приведены значения K_б для каждой из подгрупп (см. рис. 9).

Значения коэффициента жесткости условий эксплуатации K_б для интегральных микросхем

Значения K _б по группам аппаратуры ГОСТ РВ 20.39.304-98													
1.1	1.2	1.3 – 1.10	2.1.1, 2.1.2, 2.3.1, 2.3.2	2.1.3, 2.3.3	2.1.5, 2.3.5	2.2, 2.4, 2.1.4, 2.3.4	3.1	3.2	3.3, 3.4	4.1 – 4.9			
										4.6			
в условиях										5.1, 5.2			
1	1,2	1,5	1,8	2,5	3	2,5	4	1,7	5	7	2	3	1

Рис. 8. Справочник «Надежность ЭРИ»: пример таблицы со значениями K_б

Environment	K_E
G_B	.50
G_F	2.0
G_M	4.0
N_S	4.0
N_U	6.0
A_C	4.0
A_F	5.0
A_{UC}	5.0
A_{UF}	8.0
A_{RW}	8.0
S_F	.50
M_F	5.0
M_L	12
C_L	220

Рис. 9. MIL-HDBK-217: пример таблицы со значениями Π_E

Значения коэффициента жесткости условий эксплуатации K_3 для интегральных микросхем

Значения K_3 по группам аппаратуры ГОСТ РВ 20.39.304-98												
1.1	1.2	1.3 – 1.10	2.1.1,	2.1.2,	2.1.3,	2.1.5,	2.2,	3.1	3.2	3.3,	4.1 – 4.9	4.6
			2.3.1,	2.3.2,	2.3.3	2.3.5	2.4,				в условиях запуска	свободного полета
0.5	2	4	4	6	6	6	8	4	5	12	5	5
												0.5

Рисунок 10. Справочник «Надежность ЭРИ ИП»: пример таблицы со значениями $\Pi_E(K_3)$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение модели (2) хотя и дает большую погрешность из-за погрешности оценки значений λ и Π_E по сравнению с моделью (1), но вполне допустимо для расчетов эксплуатационной интенсивности отказов комплектующих элементов БЭА. Впрочем, если принять во внимание, что

отчасти эта проблема разрешена в справочнике «Надежность ЭРИ ИП» [7], в котором приведены значения K_3 для следующих классов ЭРИ иностранного производства:

- Интегральные микросхемы
- Полупроводниковые приборы
- Оптоэлектронные полупроводниковые приборы
- Резисторы
- Конденсаторы
- Трансформаторы, катушки индуктивности
- Коммутационные изделия
- Соединители
- Реле
- Лампы электрические
- Приборы пьезоэлектрические
- Установочные изделия

Пример таблицы значений коэффициента $\Pi_E(K_3)$ для класса «Интегральные микросхемы» иностранного производства для классификации групп эксплуатации по ГОСТ РВ 20.39.304 приведен на рис. 10.

ЛИТЕРАТУРА

- Справочник «Надежность ЭРИ». - М.: МО РФ, 2006.
- Абрамашин, А.Е. Информационная технология обеспечения надежности электронных средств наземно-космических систем: научное издание. / А.Е. Абрамашин, В.В. Жаднов, С.Н. Полесский; отв. ред. В.В. Жаднов. - Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2012. - 565 с.
- MIL-HDBK-217F. Reliability prediction of electronic equipment.
- Жаднов, В.В. Прогнозирование безотказности микросхем для военной и аэрокосмической электроники. / В.В. Жаднов, С.Н. Полесский, С.Э. Якубов. // Электронные компоненты. - 2007. - № 3. - с. 39-48.
- Жаднов, В.В. Особенности конструирования бортовой космической аппаратуры: учеб. пособие. / В.В. Жаднов, Н.К. Юрков. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. - 112 с.
- ГОСТ РВ 20.39.304-98. КСОТТ. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к стойкости внешних воздействующих факторов.
- Справочник «Надежность ЭРИ ИП». - М.: МО РФ, 2006.

УДК 658.562 (076.5)

Панов Д.В., Пушкин Н.И., Пономарев С.А.

ИПК «Машприбор», г. Москва, Россия

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ РКТ ПРИ ПОЛЕТАХ В ИОНОСФЕРЕ, МАГНИТОСФЕРЕ И В ЗОНЕ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ

Газообразная оболочка земного шара является атмосферой Земли. Её масса равна $5,27 \cdot 10^{21}$ г, т.е. составляет менее одной миллионной массы земного шара. В атмосфере различают несколько слоев. Нижний – до высоты 15 км называют тропосферой, от 15 до 55 км – стратосферой, от 70 до 80 км – ионосферой, от 500 до 1000 км – экзосферой (слой рассеивания), на высоте 2000 километров и более – магнитосферой. На рис. 1 представлена упрощенная схема строения атмосферы Земли [1]. Все величины усредненные и не связаны с суточным изменением солнечной активностью и др.

Атмосфера, образно говоря, «дышит» во времени и пространстве. Её состояние определяется прежде всего влиянием Солнца. Истекающий из Солнца газ, благодаря своей высокой температуре, преодолевает силы притяжения Солнца и в окрестностях Земли движется почти с постоянной скоростью, около 500 км/ч.

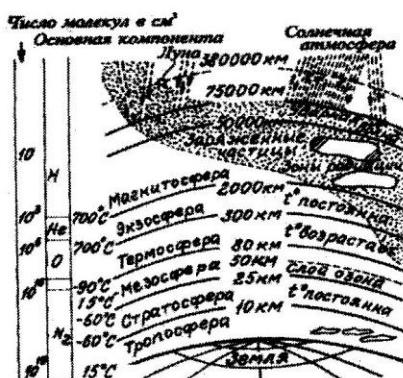


Рис. 1 – Характер изменения свойств атмосферы, ее состава, плотности и температуры